



Anhang A:

FEP-Liste
für eine Abdichtung aus Salzbeton
in die Phase des Abbindens

- Entwurf -



VORBEMERKUNGEN	1
Definition der betrachteten Teilsysteme	1
Methodik der FEP-Analyse	2
Einführung der makroskopischen Systembeschreibung	2
Merkmale, Prozesse und Ereignisse (FEP)	3
Systematik bei der Zusammenstellung der FEP	5
Grenzen der makroskopischen Systembeschreibung	7
(A.1) INTERNE FEP	9
(a.1.1) Merkmale (Zustände und Eigenschaften)	9
(a.1.1.1) Charakterisierung des Verfüllstoffs (Salzbeton)	9
(a.1.1.2) Charakterisierung der Einbauten	13
(a.1.1.3) Charakterisierung der Kontaktfuge (KF)	14
(a.1.1.4) Charakterisierung der abdichtungsnahen Zone (AZ)	17
(a.1.2) Interne Prozesse (in den Abdichtungen ablaufend)	19
(a.1.2.1) chemische Prozesse	22
(a.1.2.2) thermische Prozesse	26
(a.1.2.3) mechanische Prozesse	26
(a.1.2.4) stofftransportbezogene Prozesse	29
(A.2) KOPPELNDE PROZESSE	30
(a.2.1) Stoffaustausch	30
(a.2.2) Energieaustausch	31
(a.2.3) Kraftkopplung	31
(A.3) EXTERNE FEP	32
(a.3.1) Merkmale (Zustände und Eigenschaften) der Umgebung	32
(a.3.1.1) Charakterisierung des umgebenden Gebirges (ohne AZ)	32
(a.3.1.2) Charakterisierung der angrenzenden verfüllten Grubenbaue	32
(a.3.1.3) Charakterisierung der angrenzenden offenen Grubenbaue	33
(a.3.2) Ereignisse und Prozesse in der Umgebung	33
(a.3.2.1) stoffbezogene Ereignisse und Prozesse	33
(a.3.2.2) thermische Prozesse	33
(a.3.2.3) mechanische Ereignisse und Prozesse	34
(a.3.2.4) stofftransportbezogene Ereignisse und Prozesse	34

VORBEMERKUNGEN

Im folgenden werden die FEP für eine Abdichtung aus Salzbeton in einer Strecke im Salzgestein in der Phase des Abbindens zusammengestellt. Hierzu definieren wir im Folgenden zunächst die betrachteten Teilsysteme und beschreiben dann die Methodik, nach der wir die FEP ableiten.

Definition der betrachteten Teilsysteme

Die Abdichtungen bestehen neben dem Hauptbestandteil **Salzbeton (SB)** auch aus **Einbauten** (Trennbleche, Leitungen, Abspannungen, Stützkonstruktionen, Befestigungen am Stoß). Weiterhin werden den Abdichtungen die Auflockerungszone des angrenzenden Salzgebirges und die Kontaktzone zwischen Salzbetonkörper und Streckenkontur zugeordnet („**Kontaktfuge**“ (**KF**)). Definiert man die Auflockerungszone als den tatsächlich aufgelockerten Bereich, dann ist die Geometrie der Abdichtung i. A. zeitabhängig, da sich bislang kompakte Gebirgsbereiche in der Umgebung der Abdichtung künftig auflockern können. Dies ist für die Analyse unzuverlässig. Anstelle des tatsächlich aufgelockerten Gebirgsbereichs betrachten wir statt dessen eine „**abdichtungsnahe (Gebirgs)Zone**“ (**AZ**), die eine von der Zeit unabhängige räumliche Erstreckung aufweist. Sie ist definiert als der die Abdichtung umgebende Gebirgsbereich, der im Laufe der Zeit auflockern kann.

Die Rezeptur des Salzbetons besteht aus einem **Bindemittel**, salzhaltiger Anmachlösung und **Salzgrus** (Zuschlagstoff). Sonstige Zusatzstoffe rechnen wir dem Bindemittel zu. Während des Abbindeprozesses ändert sich das Bindemittel durch seine Reaktionen mit der Lösung grundlegend und es werden große Teile der Lösung und auch in Lösung gehende Teile des Salzgruses in die neu entstehenden Feststoffphasen eingebaut. Diese neuentstehenden Feststoffphasen bezeichnen wir ebenfalls als Bindemittel. Im erstarrenden Salzbeton definieren wir als Bindemittel alle Festphasen, die sich neu bilden und eine mechanische Kopplung

- untereinander,
- mit den (bisher) nicht reagiert habenden Anteilen des Zuschlagstoffes,
- mit den Einbauten und
- mit dem Salzgestein an der Streckenkontur

bewirken bzw. bewirken können. Die stoffabhängigen Kenngrößen, die die Kopplung des Bindemittels mit anderen Materialien (Salzgrus, Einbauten und Salzgestein an der Streckenkontur) beschreiben, rechnen wir dem Bindemittel zu.

Da die Einbauten vor Einbringen des Salzbetons an der Streckenkontur befestigt werden, besteht auch eine direkte mechanische Kopplung zwischen Einbauten und dem Salzgestein an der Streckenkontur. Die Kenngrößen, die diese Kopplung beschreiben, rechnen wir den Einbauten zu.

Die Teile der Grube und des umgebenden Gebirges, die die Abdichtung beeinflussen können und deshalb bei der Systembeschreibung berücksichtigt werden müssen, bezeichnen wir als **Umgebung**. Die Beschreibung der Umgebung braucht nur in dem Umfang zu erfolgen, dass hierdurch die Beeinflussungen der Beeinflussung der Abdichtung erfasst werden.

Methodik der FEP-Analyse

Einführung der makroskopischen Systembeschreibung

Die für die LSA zentrale Eigenschaft einer Abdichtung ist ihre Permeabilität gegenüber Lösungen. Weitere, weniger relevante Eigenschaften sind die Permeabilität gegenüber Gasen und der Gaseindringdruck der Abdichtung, für die sich aus den durchgeführten LSA keine Anforderungen ergeben.

Alle übrigen Eigenschaften einer Abdichtung sind nur insofern von Bedeutung, wie sie die Permeabilitäten und den Gaseindringdruck direkt oder indirekt beeinflussen. Ebenso sind die in einer Abdichtung ablaufenden Prozesse und die äußeren Einwirkungen auf eine Abdichtung im Hinblick auf die LSA nur insofern von Bedeutung, als sie zu Veränderungen der genannten stofftransportbezogenen Eigenschaften der Abdichtung führen.

Eine Abdichtung besteht aus miteinander über chemische Bindungen verbundenen festen Bestandteilen, zwischen denen sich Hohlräume befinden. Der Lösungsfluss und der Gasfluss durch die Abdichtung können nur über diese Hohlräume erfolgen. Lösungsfluss ist an lösungs(teil)gefüllte Hohlräume gebunden, Gasfluss an gas(teil)gefüllte Hohlräume. Die Höhe des Flusses eines Fluids durch die Hohlräume hängt u. a.

- von der räumlichen Gestalt und Anordnung der Hohlräume,
- den physikalisch/chemischen Eigenschaften der Hohlraumwandungen,
- der räumlichen Verteilung anderer Fluide in den Hohlräumen,
- den physikalisch/chemischen Eigenschaften dieser anderen Fluide und
- den physikalisch/chemischen Eigenschaften der eigenen Fluidbestandteile

ab. Neben den stofftransportbezogenen Eigenschaften werden auch andere hier relevante Eigenschaften der Abdichtung durch die mikroskopische Anordnung von Feststoff und Hohlraum (einschließlich Lage der Feststoffverbindungen), den physikalisch/chemischen Eigenschaften ihrer Bestandteile (einschließlich der Stärke der Feststoffverbindungen) und den physikalisch/chemischen Eigenschaften der in ihnen enthaltenden Fluidbestandteile bestimmt.

Eine Systembeschreibung umfasst die Beschreibung des Systemzustands, der Systemeigenschaften und der im System ablaufenden Prozesse¹. Eine mikroskopische Beschreibung der Abdichtungen müsste die Lage, die Geschwindigkeit und die Eigenschaften aller mikroskopischen Teilchen und alle zwischen ihnen bestehenden bzw. möglichen Wechselwirkungen enthalten.

Zur näherungsweise Erfassung und Beschreibung dieser im Detail unfassbar komplexen Zusammenhänge ist es erforderlich, die Beschreibung des Systems zu vereinfachen. Hierzu wird eine räumliche und zeitliche Mittelung durchgeführt, durch die die mikroskopische Systembeschreibung

¹ Eine Definition dieser Begriffe erfolgt weiter unten.

in eine makroskopische Beschreibung überführt wird. Das Mittelungsvolumen („repräsentatives Elementarvolumen“ (REV)) bestimmt den räumlichen Detaillierungsgrad der Beschreibung.

Enthält das System poröse Feststoffe (z. B. Salzbeton), dann treten bei der Beschreibung an die Stelle der mikroskopischen Strukturen aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen nun homogene Feststoffe, die einen „inneren“ räumlich nicht mehr auflösbaren Porenhohlraum enthalten, der mit Flüssigkeit und/oder Gas gefüllt ist. Die Größe des inneren Hohlraums bzw. die in ihm enthaltene Flüssigkeits- oder/und Gasmenge ist messtechnisch bestimmbar, seine Struktur jedoch nicht. Hohlräume, die (in mindestens einer räumlichen Dimension) größer als das REV sind, sind auch in dieser makroskopischen Beschreibung eigenständige Systembestandteile (Linien-, Flächen- oder Volumenelemente).

Durch diese Mittelung wird das reale System nur noch unvollständig beschrieben. Der Vorteil der makroskopischen Systembeschreibung besteht darin, dass die Anzahl der Größen zur Charakterisierung des Systems drastisch reduziert wird.

Merkmale, Prozesse und Ereignisse (FEP)

Auf makroskopischer Ebene kann ein System beschrieben werden durch

- die räumliche Verteilung der im System enthaltenen Stoffe,
- die Arten und räumlichen Verteilungen der im System enthaltenen Energien bzw. der wirkenden Kräfte,
- die im System stattfindenden Prozesse und
- die Eigenschaften der Stoffe.

Die Angaben zu den beiden ersten Punkte beschreiben den Zustand des Systems. Die Größen, die für diese Beschreibung verwendet werden, bezeichnen wir als **Zustandsgrößen**.

Wir unterscheiden zwischen *äußeren* und *inneren* Zustandsgrößen. Äußere Zustandsgrößen sind durch makroskopische Messungen (d. h. Messungen mit einer räumlichen Auflösung des REV) prinzipiell bestimmbar. Beispiele sind die Temperatur oder die Porosität. Innere Zustandsgrößen können durch makroskopische Messungen nicht (direkt) bestimmt werden, sie äußern sich aber durch Änderungen in den Materialeigenschaften. Beispielsweise könnte die Anzahl der (durch plastische Verformung) zerstörten chemischen Bindungen eines Feststoffs eine solche innere Zustandsgröße sein. Sie ist nicht messbar, kann aber zu einer Änderung der mechanischen Materialeigenschaften führen, die üblicherweise als „Alterung“ oder „Materialermüdung“ bezeichnet wird. Zur makroskopischen Systembeschreibung können nur die (zugänglichen) äußeren Zustandsgrößen verwendet werden. Die inneren Zustandsgrößen können zur Systembeschreibung nicht verwendet werden, sie sind jedoch bei der Beschreibung der Materialeigenschaften zu berücksichtigen (s. u.).

Alle für die Systembeschreibung relevanten Abläufe im System führen zur Änderungen mindestens einer der Zustandsgrößen. Als **Prozesse** bezeichnen wir Abläufe, die zu Änderung mindestens einer Zustandsgröße führen, und die ihre Ursache innerhalb des Systems haben. Als **Ereignisse** bezeichnen wir das System beeinflussende Abläufe, die ihre Ursache außerhalb des Systems haben.

Ereignisse können Prozesse auslösen oder verändern. Prozesse, die zur Änderung mindestens einer äußeren Zustandsgröße führen, bezeichnen wir als *äußere* Prozesse. Prozesse, die ausschließlich innere Zustandsgrößen verändern, bezeichnen wir als *innere* Prozesse.

Zu jedem äußeren Prozess kann als Ursache eine (äußere) Zustandsgröße angegeben werden, die nicht im thermodynamischen Gleichgewicht ist. In der Thermodynamik werden diese Zustandsgrößen „intensiv“ genannt. Intensive Zustandsgrößen sind von der Systemgröße unabhängig wie zum Beispiel der Gasdruck und die Temperatur bei einem idealen Gas ohne Anliegen eines äußeren Feldes. Der Prozess äußert sich durch die Änderung dieser Zustandsgröße, die wir im Folgenden mit X bezeichnen. Die Änderung dieser Zustandsgröße X hat i. A. zur Folge, dass sich auch andere Zustandsgrößen verändern, beispielsweise die extensive Zustandsgröße Y . Extensive Zustandsgrößen sind additive Größen (wie zum Beispiel das Gasvolumen). Der Zusammenhang zwischen der Änderung einer intensiven Zustandsgröße X und der Änderung einer extensiven Zustandsgröße Y bezeichnen wir als **Materialeigenschaft**:

$$S = \frac{\partial Y}{\partial X}$$

Diese Materialeigenschaften können von anderen intensiven Zustandsgrößen abhängen. Die Abhängigkeiten der Materialeigenschaften von den äußeren (= makroskopischen) Zustandsgrößen werden durch Funktionen beschrieben, die Konstanten (die **Materialparameter**) und Variablen (die äußeren Zustandsgrößen) enthalten. Die Materialparameter sind per Definition unabhängig von den äußeren Zustandsgrößen, sie können aber von den inneren Zustandsgrößen abhängen. Da diese unbekannt sind, äußert sich diese Abhängigkeit in einer empirisch beschriebenen örtlichen oder/und zeitlichen Variabilität der Materialparameter.

Für die Systembeschreibung verwenden wir die folgenden Elemente:

- Merkmale (englisch: features):
 - äußere (= makroskopische) Zustandsgrößen
 - Materialparameter
 - Materialeigenschaften
Wir rechnen die Materialeigenschaften ebenfalls zu den Merkmalen. Da sie aus den äußeren Zustandsgrößen und den Materialparametern ermittelt werden, sind sie jedoch keine zusätzlichen, unabhängigen Größen.
- Prozesse (englisch: processes)
 - Änderungen der äußeren (= makroskopischen) Zustandsgrößen (äußere Prozesse)
 - Änderungen der Materialparameter (innere Prozesse)
 - Änderung der Materialeigenschaften (äußere und innere Prozesse)
- Ereignisse (englisch: events)

Das System beeinflussende Abläufe, die ihre Ursache außerhalb des Systems haben.

Systematik bei der Zusammenstellung der FEP

Die Zusammenstellung der FEP erfolgt in den Schritten:

- Beschreibung der räumlichen Stoffverteilung
- Zusammenstellung der (äußeren) Zustandsgrößen
- Zusammenstellung der Prozesse (als Reaktionen auf Ungleichgewichte äußerer Zustandsgrößen)
- Zusammenstellung der Materialeigenschaften und –parameter (als Reaktionen anderer äußerer Zustandsgrößen)
- Zusammenstellung innerer Zustandsgrößen und Prozesse und deren mögliche Einflüsse auf die Materialparameter
- Zusammenstellung der Ereignisse

In der Praxis ist die Zusammenstellung der FEP ein iterativer Vorgang, da sich bei der Beschäftigung eines Schrittes herausstellen kann, dass die im vorausgegangenen Schritt durchgeführte Analyse unvollständig war.

Im folgenden werden die ersten beiden Schritte weiter erläutert.

Beschreibung der räumlichen Stoffverteilung

Ein System besteht aus Systemelementen. Ein Systemelement ist definiert als ein (1-, 2- oder 3-dimensional) zusammenhängender Bereich des Systems, in dem sich alle Materialeigenschaften kontinuierlich (also sprunghaft) ändern. Die Grenze zwischen zwei Systemelementen drückt sich als Sprung mindestens einer Materialeigenschaft aus². Es gibt Volumen-, Flächen- und Linien-Systemelemente.

Das gesamte zum System gehörende Volumen wird durch Volumen-Systemelemente ausgefüllt³. Jeder Teil des Raums wird durch (genau) ein Volumen-Systemelement belegt.

Flächen-Systemelemente können

- zwischen einem randlichen Volumen-Systemelement und der Umgebung (über diese können z. B. Ereignisse einwirken).
- zwischen zwei benachbarten Volumen-Systemelementen und
- innerhalb eines Volumenelements

liegen.

Linien-Systemelemente können

- zwischen benachbarten Flächen-Systemelementen,
- innerhalb eines Flächen-Systemelements und

² Liegen beispielsweise zwei Körper aus dem gleichen Material ohne Kraftverbund nebeneinander, müssen sie durch zwei Volumen-Systemelemente beschrieben werden, da sich an der Kontaktfläche der Spannungstensor sprunghaft ändert.

³ Makroskopische Hohlräume sind auch Volumen-Systemelemente.

- innerhalb eines Volumen-Systemelements
(z. B. ein makroskopischer, nahezu volumenfreier Riss)
liegen.

Die Systemelemente werden durch ihre Form und Lage sowie ihre Materialeigenschaften bzw. Materialparameter charakterisiert. Volumen-, Flächen- und Linien-Systemelemente weisen unterschiedliche Materialkenngrößen auf.

Zusammenstellung der Zustandsgrößen

Die (makroskopischen) Zustandsgrößen können durch die Analyse der in dem System gespeicherten Energien und den herrschenden Kräfte bzw. Wechselwirkungen ermittelt werden. Im Fall der Abdichtungen kann die im System gespeicherte Energie differenziert werden nach

- der in der Materie chemisch gebundenen Energie
- der in der Materie enthaltenen ungeordneten kinetischen Energie (thermische Energie)
- der in der Materie enthaltenen geordneten Bewegungsenergie (hier nicht relevant)
- der Lageenergie die Materie, differenziert nach
 - der Lage in einem äußeren Feld (hier nur das Gravitationsfeld)
 - der Lage in einem Kraftfeld, das die benachbarten Teilchen durch (mechanischen) Kraftübertrag über chemische Verbindungen erzeugen (Spannungen in Festkörpern),
 - der Lage in einem Kraftfeld, das die benachbarten Teilchen durch ungeordnete Stöße erzeugen (Drücke in Fluiden),
 - der Lage in einem Kraftfeld, das die benachbarten Teilchen durch elektrische Felder erzeugen (Oberflächenspannungen, Saugspannungen).

Externe elektrische und magnetische Felder werden vernachlässigt, ebenso wie die in den Stoffen gespeicherten Energieanteile aufgrund der schwachen und der starken Wechselwirkung.

Neben diesen an die Stoffe gebundenen Energieformen sind auch elektromagnetische Felder als Energieträger zu berücksichtigen. Die in den Feldern gespeicherte Energie ist ihrer Höhe nach vernachlässigbar gering, als Energieträger können die Felder jedoch relevant werden („Wärmestrahlung“).

Die Wesensmerkmale eines Systems sind die in ihm enthaltenen Stoffmengen einschließlich ihrer räumlichen Anordnung⁴ („**stofflicher Zustand**“), die in ihm enthaltene Energie (als Bewegungsenergie und gespeicherte Energie) und die in ihm wirkenden Kräfte.

Die in chemischen Verbindungen gespeicherte Energie wird durch den **chemischen Zustand**, d. h. die Angabe der vorhandenen chemischen Stoffen in ihren Verbindungen erfasst. Die chemischen

⁴ Zur räumlichen Anordnung gehören die Volumina und Oberflächen der verschiedenen Phasen.

Prozesse der Festphase laufen fast immer mit der Flüssig- und der Gasphase ab⁵. Eine vollständige chemische Charakterisierung eines Systems umfasst deshalb auch die chemische Charakterisierung der Flüssig- und der Gasphase („chemisches Milieu“).

In der makroskopischen Beschreibung wird die im System enthaltene ungeordnete Bewegungsenergie durch die Temperatur als Zustandsgröße erfasst („**thermischer Zustand**“).

Die im System enthaltene potentielle Energie ergibt sich aus der Höhenlage der Stoffe im Gravitationsfeld der Erde (durch die Anordnung der Stoffmengen erfasst) und den Drücken. Die auf mikroskopischer Ebene vorhandenen vielfältigen Kräfte reduzieren sich im makroskopischen System auf den (mechanischen) Spannungszustand in den Festphasen, der durch den Spannungstensor beschrieben wird, und die im System herrschenden Fluiddrücke bzw. Saugspannungen (aufgrund von Oberflächenkräften). Diese Größen fassen wir als „**mechanischer Zustand**“ zusammen.

Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung fassen wir die Zustandsgrößen, die den Fluidtransport betreffen, als „**stofftransportbezogener Zustand**“ zusammen.

Wir gliedern im folgenden nach

- stofflich/chemischem Zustand,
- mechanischem Zustand,
- thermischem Zustand und
- stofftransportbezogener Zustand.

Analog differenzieren wir zwischen

- chemischen Materialkenngrößen,
- mechanischem Materialkenngrößen,
- thermischem Materialkenngrößen und
- stofftransportbezogenen Materialkenngrößen.

Grenzen der makroskopischen Systembeschreibung

Die vereinfachte Charakterisierung des Systems durch makroskopische Zustands- und Materialkenngrößen kommt bei der Prognose des künftigen Systemverhaltens an Grenzen, wie folgende Beispiele zeigen:

- Bei der hier gewählten makroskopischen Beschreibung sind die chemischen Zusammensetzungen der Flüssigphase und der Gasphase Mittelungen über makroskopische Raumbereiche. Tatsächlich kann die Zusammensetzung dieser Phasen auf mikroskopischer Basis stark mit dem Ort variieren. Da die chemischen Reaktionsraten der Festphasen vom lokalen (u. U. mikroskopischen) chemischen Milieu abhängen, kann die Verwendung von makroskopischen

⁵ Lediglich manche Umkristallisationsprozesse metastabiler Phasen können ohne Anwesenheit einer Flüssig- oder Gasphase stattfinden.

Mittelwerten Komplikationen bei der Prognose von Art und Umfang chemischer Reaktionen ergeben. Bei Prognosen werden deshalb häufig „effektive“ Reaktionsraten gewählt, die von der räumlich gemittelten Zusammensetzung der Fluide abhängen.

- Die bei der makroskopischen Beschreibung verwendeten Festphasen sind häufig idealisierte, reine Phasen. Tatsächlich weisen die Festphasen häufig Unregelmäßigkeiten auf, die zu einem von den reinen Festphasen abweichenden chemischen Verhalten führen. Bei Prognosen werden deshalb häufig „effektive“ Festphasen mit „effektiven“ Materialkenngrößen gewählt, die eine Gruppe von tatsächlich vorkommenden Festphasen repräsentieren sollen.
- Die Kenntnis der makroskopischen Materialkenngrößen Porosität und Porengrößenverteilung erlaubt keine Aussage zur räumlichen Verbindung der Poren untereinander. Dies hat zur Konsequenz, dass innerhalb von massiven Stoffen kein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen diesen Größen und den Permeabilitäten besteht⁶. Prognosen zur Permeabilität aufgrund von Änderungen in der Porosität können nur anhand eines empirischen, auf der Basis stoffspezifischer Untersuchungen ermittelten Zusammenhangs erfolgen. Finden Stoffumwandlungen in größerem Umfang statt, kann die für den Ausgangsstoff ermittelte Porosität-Permeabilität-Beziehung ihre Gültigkeit verlieren.

Solche Beschränkungen sind bei der Analyse der möglichen Prozesse und bei der Nachweisführung zu berücksichtigen. Hierbei ist es wichtig, den Gültigkeitsbereich der verwendeten „effektiven“ Materialkenngrößen und Prozessbeschreibungen zu kennen und einzuhalten.

In der folgenden Zusammenstellung werden einige FEP mehrfach aufgeführt, da sie in verschiedenen Zusammenhängen zu berücksichtigen sind. Durch Kursivdruck weisen wir auf eine wiederholte Nennung hin.

⁶ Für lose oder verfestigte Schüttungen (wie Sand oder Sandstein) lassen sich auch stoffunabhängige Zusammenhänge angeben.

(A.1) INTERNE FEP

(a.1.1) Merkmale (Zustände und Eigenschaften)

(a.1.1.1) Charakterisierung des Verfüllstoffs (Salzbeton)

(a.1.1.1.1) stofflich/chemische Charakterisierung des Verfüllstoffs

(a.1.1.1.1.1) Zustandsgrößen

Der Verfüllstoff Salzbeton besteht aus der Festphase, differenziert nach Bindemittel und Salzgrus (jeweils bestehend aus verschiedenen Mineralphasen), der Flüssigphase und der Gasphase. Alle Phasen bestehen aus unterschiedlichen Stoffen, die wir im folgenden Spezies nennen. (Im Fall des Bindemittels und des Salzgrus sind die Spezies die Mineralphasen). Größen zur Beschreibung des stofflichen Zustands (in Bezug auf die Menge der Stoffe und ihre räumliche Anordnung) sind

(a.1.1.1.1.1.1) Gesamtvolumen und räumliche Anordnung des Verfüllstoffs,

(a.1.1.1.1.1.2) Größe und Lage der Kontaktflächen zu benachbarten Elementen:

- Einbauten (bzw. dem diese umgebenden Spalt),
- KF,
- sonstige Begrenzungen

Innerhalb des Verfüllstoffs werden folgende Zustandsgrößen verwendet:

(a.1.1.1.1.1.3) spezifisches Volumen der Festphase

(a.1.1.1.1.1.4) spezifisches Volumen der Flüssigphase

(a.1.1.1.1.1.5) spezifisches Volumen der Gasphase

(a.1.1.1.1.1.6) Konzentrationen der Spezies in der Festphase (Stoffmengen je Volumen der Festphase),

(a.1.1.1.1.1.7) Konzentrationen der Spezies in der Flüssigphase (Stoffmengen je Volumen der Flüssigphase) und

(a.1.1.1.1.1.8) Konzentrationen der Spezies in der Gasphase (Stoffmengen je Volumen der Gasphase),

Die Zustandsgrößen sind z. T. nicht unabhängig voneinander. Beispielsweise müssen die spezifischen Volumina (a.1.1.1.1.1.3), (a.1.1.1.1.1.4) und (a.1.1.1.1.1.5) stets 1 ergeben.

Aus diesen Zustandsgrößen lassen sich weitere üblicherweise verwendeten Zustandsgrößen ableiten:

- Porosität⁷ (als Summe aus (a.1.1.1.1.4) und (a.1.1.1.1.5)),
- Porensättigung (als Verhältnis des spezifischen Volumen der Flüssigphase (a.1.1.1.1.4) zur Porosität),
- Feststoffdichte der Festphase (aus (a.1.1.1.1.6) bei Kenntnis der Molgewichte der Mineralphasen),
- Gaspartialdrücke (aus (a.1.1.1.1.8) unter Verwendung einer Gasgleichung und bei Kenntnis der Temperatur).

Die volumenspezifischen inneren Kontaktflächen zwischen Festphase, Flüssigphase und Gasphase ordnen wir den inneren Zustandsgrößen zu, da sie direkten makroskopischen Messungen nicht zugänglich sind. Unter den hier herrschenden Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen gehen wir jedoch von einer vollständigen Benetzung der inneren Kontaktflächen der Festphasen mit der Flüssigphase aus, so dass keine Kontaktfläche zwischen den einzelnen Festphasen und der Gasphase besteht.

(a.1.1.1.2) chemische Materialkenngrößen

Die Festphasen weisen jeweils die folgenden chemischen Materialkennwerte auf:

(a.1.1.1.2.1) Löslichkeitsprodukte,

(a.1.1.1.2.2) Reaktionsraten

Die chemischen Materialkenngrößen sind abhängig von den Zustandsgrößen

- spezifische Festphasenoberflächen,
- chemisches Milieu in der Flüssigphase⁸,
- chemisches Milieu in der Gasphase (Partialdrücke)
(wird vernachlässigt, s. u. Annahme (A3)),
- Temperatur; s. (a.1.1.1.2).

Die Festphasen können alternativ auch durch zustandsgrößenunabhängige Materialkenngrößen charakterisiert werden, aus denen die o. g. chemischen Materialkenngrößen in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen ermittelt werden.

(a.1.1.1.2) thermische Charakterisierung des Verfüllstoffs (Salzbeton)

(a.1.1.1.2.1) Zustandsgrößen

Der thermische Zustand wird durch die ist die

(a.1.1.1.2.1.1) Temperatur

charakterisiert.

⁷ In diesem Abschnitt differenzieren wir nicht zwischen Poren und (Mikro-)Rissen.

⁸ Die Abhängigkeiten bestehen eigentlich vom lokalen, mikroskopischen chemischen Milieu. Hier wird eine (ggf. empirisch ermittelte) Abhängigkeit vom makroskopischen chemischen Milieu unterstellt.

(a.1.1.1.2.2) thermische Materialkenngrößen

Thermische Materialkenngrößen des Verfüllstoffs sind

(a.1.1.1.2.2.1) Wärmekapazität

(a.1.1.1.2.2.2) Wärmeleitfähigkeit

(a.1.1.1.2.2.3) thermischer Ausdehnungskoeffizient

(a.1.1.1.3) mechanische Charakterisierung des Verfüllstoffs (Salzbeton)

(a.1.1.1.3.1) mechanische Zustandsgrößen

Der mechanische Zustand wird durch den

(a.1.1.1.3.1.1) Spannungstensor

(a.1.1.1.3.1.2) Druck (bzw. Saugspannung) in der Flüssigphase

(a.1.1.1.3.1.3) Druck in der Gasphase

charakterisiert⁹.

Die Saugspannung (im ungesättigten Zustand) in der Flüssigphase ist über Materialkenngrößen mit der Zustandsgröße „Porensättigung“ verknüpft.

(a.1.1.1.3.2) mechanische Materialkenngrößen

Mechanische Materialkenngrößen des Verfüllstoffs sind

(a.1.1.1.3.2.1) Parameter zur Beschreibung der elastischen und plastischen Verformungen („Verformungsparameter“)¹⁰:

Druck-/Zug-E-Modul, Schubmodul, Kriechparameter, Parameter zur Beschreibung der Dilatanz und der Kontraktion, ...

(a.1.1.1.3.2.2) Parameter zur Beschreibung der Rissbildung im Verfüllstoff („Rissbildungsparameter“):

Zug-/Druck-Festigkeit, ...

(a.1.1.1.3.2.3) Parameter zur Beschreibung der Rissbildung an der Grenzfläche zu den Einbauten („Kontaktparameter“):

Haftfestigkeiten, ...

Die mechanischen Materialkenngrößen sind (z. T.) abhängig von den Zustandsgrößen

- Porosität,
- Porensättigung,
- chemischem Zustand der Festphasen
(z. B. durch das „Betonalter“ charakterisiert),
- Temperatur

⁹ Durch die mechanischen Prozesse wird zwar die Zustandsgröße „räumliche Anordnung des Verfüllstoffs“ verändert. Dennoch ist diese eine stoffliche und keine mechanische Zustandsgröße.

¹⁰ Zur Erläuterung der verschiedenen Verformungsprozesse s. u. (Abschnitt „Prozesse“).

Der Verfüllstoff kann alternativ auch durch zustandsgrößenunabhängige Materialkenngrößen charakterisiert werden, aus denen die o. g. mechanischen Materialkenngrößen in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen ermittelt werden.

(a.1.1.1.4) stofftransportbezogene Charakterisierung des Verfüllstoffs (Salzbeton)

(a.1.1.1.4.1) stofftransportbezogene Zustandsgrößen

Als stofftransportbezogene Zustandsgrößen bezeichnen wir die Zustandsgrößen, deren Gradient einen Stofftransport zur Folge hat. Z. T. handelt es sich hierbei um stoffliche Zustandsgrößen; s. (a.1.1.1.1).

Zur Beschreibung des stofftransportbezogenen Zustands werden die folgenden Größen verwendet:

(a.1.1.1.4.1.1) hydraulisches Potential
(Gradient verursacht Advektion der Flüssigphase),

(a.1.1.1.4.1.2) hydrostatisches Potential der Gasphase
(Gradient verursacht Advektion der Gasphase)

(a.1.1.1.4.1.3) Stoffkonzentrationen in der Flüssigphase
(Gradient verursacht Diffusion in der Flüssigphase)

(a.1.1.1.4.1.4) Stoffkonzentrationen in der Gasphase / Gaspartialdrücke
(Gradient verursacht Diffusion in der Gasphase).

Das hydraulische Potential der Flüssigphase ergibt sich aus dem Druck (bzw. der Saugspannung) (a.1.1.1.3.1.2) und der Höhenlage.

Das hydrostatische Potential der Gasphase ergibt sich aus dem Druck der Gasphase (a.1.1.1.3.1.3) und der Höhenlage. Es wird häufig mit dem Gasdruck gleichgesetzt, da aufgrund der geringen Dichte von Gas der Gasdruck nur sehr schwach von der Höhe abhängt.

(a.1.1.1.4.2) stofftransportbezogene Materialkenngrößen

Der Verfüllstoff weist die folgenden stofftransportbezogene Materialkennwerte auf:

(a.1.1.1.4.2.1) Diffusionskonstanten,

(a.1.1.1.4.2.2) Permeabilitäten,

(a.1.1.1.4.2.3) Sorptionskoeffizienten.

Unterschiedliche Gase und unterschiedliche Lösungsinhaltsstoffe weisen i. A. unterschiedliche Diffusionskonstanten auf. Unterschiedliche Gase und unterschiedliche Flüssigkeiten weisen unterschiedliche Permeabilitäten auf. Gründe hierfür sind ihre unterschiedlichen Eigenschaften (Molekül-/Ionengröße, Molekulargewicht, Ladung und deren räumliche Verteilung) und die physikalisch/chemischen Wechselwirkungen zwischen den Gas- und Flüssigkeitsmolekülen/-ionen) mit den Festphasen.

Häufig wird die Permeabilität als eine von den Fluiden unabhängige Materialeigenschaft eines Feststoffs dargestellt. Dies gilt jedoch nur für idealisierte, nicht mit den Festphasen wechselwirkende Fluide. Die chemischen Reaktionen mit den Festphasen der Abdichtung können die chemische Zusammensetzung und dadurch auch die Viskosität der sie durchströmenden Lösungen und Gase verändern. Weiterhin können Sorptions- und Oberflächenspannungseffekte die Durchströmung beeinflussen. Daher ist eine vom Fluid entkoppelte Darstellung der Feststoffeigenschaften hier nicht geeignet.

Die stofftransportbezogenen Materialkenngrößen sind abhängig von den Zustandsgrößen

- spezifische (innere) Oberflächen der Festphasen,
- Porosität,
- Porensättigung,
- chemisch/mineralogische Zusammensetzung der Festphasen,
- chemische Zusammensetzung der Flüssigphase („chemisches Milieu“),
- Temperatur.

(a.1.1.2) Charakterisierung der Einbauten

(a.1.1.2.1) stofflich/chemische Charakterisierung der Einbauten

(a.1.1.2.1.1) Zustandsgrößen

(a.1.1.2.1.1.1) räumliche Anordnung der Einbauten
(differenziert nach Materialien)

(a.1.1.2.1.1.2) Massen der Materialien

(a.1.1.2.1.1.3) Dichte der Materialien
(zur Charakterisierung ihres Volumens)

(a.1.1.2.1.1.4) (äußere) Oberflächen der Materialien

(a.1.1.2.1.1.5) chemische Zusammensetzung der Materialien¹¹

(a.1.1.2.1.2) chemische Materialkenngrößen¹¹

(a.1.1.2.1.2.1) Löslichkeitsprodukte,

(a.1.1.2.1.2.2) Reaktionsraten

einschließlich deren Abhängigkeiten (von Zustandsgrößen)

¹¹ Für die Phase des Abbindens vernachlässigen wir die chemischen Reaktionen der Einbauten, s. u.. Aus diesem Grund ist die chemische Charakterisierung der Einbauten in dieser Phase nicht erforderlich. Für die Bestehensphase ist sie jedoch erforderlich.

(a.1.1.2.2) thermische Charakterisierung der Einbauten

(a.1.1.2.2.1) Zustandsgrößen

(a.1.1.1.2.2.1) Temperatur

(a.1.1.2.2.2) thermische Materialkenngrößen

(a.1.1.2.2.2.1) Wärmekapazität

(a.1.1.2.2.2.2) Wärmeleitfähigkeit

(a.1.1.2.2.2.3) thermischer Ausdehnungskoeffizient

(a.1.1.2.3) mechanische Charakterisierung der Einbauten

(a.1.1.2.3.1) mechanische Zustandsgrößen

(a.1.1.2.3.1.1) Spannungstensor

(a.1.1.1.3.2) mechanische Materialkenngrößen

(a.1.1.2.3.1.1) Verformungsparameter

(a.1.1.2.3.1.2) Rissbildungsparameter

(a.1.1.2.3.1.3) Kontaktparameter

Wir gehen davon aus, dass die mechanischen Materialkenngrößen der Einbauten während der Abbindephase unabhängig von der Temperatur sind und dass sich ihr chemischer Zustand in dieser Zeit nicht ändert. Die mechanischen Materialkenngrößen sind dann unabhängig von anderen Parametern.

(a.1.1.2.4) stofftransportbezogene Charakterisierung der Einbauten

Wir gehen davon aus, dass die Einbauten während der Abbindephase massiv sind und keinen Stofftransport durch die Einbauten ermöglichen.

(a.1.1.3) Charakterisierung der Kontaktfuge (KF)

Als Kontaktfuge bezeichnen wir den Zwischenraum zwischen SB und AZ einschließlich der Grenzflächen des Verfüllkörpers (SB) und des angrenzenden abdichtungsnahen Gebirges (AZ). Bei geschlossener KF wird sie durch die Verbundfestigkeit von SB und AZ charakterisiert. Insgesamt wird die KF durch die folgenden Größen charakterisiert:

(a.1.1.3.1) stofflich/chemische Charakterisierung der KF

(a.1.1.3.1.1) Zustandsgrößen

(a.1.1.1.1.1.1) Volumen und räumliche Erstreckung

(a.1.1.1.1.1.2) Größe und Lage der (Teil-)Flächen mit kraftschlüssigem Verbund von SB und AZ

(a.1.1.1.1.1.3) spezifisches Volumen der Flüssigphase

(a.1.1.1.1.1.4) spezifisches Volumen der Gasphase

- (a.1.1.1.1.5) chemisch/mineralogische Zusammensetzung der SB-Kontaktfläche
- (a.1.1.1.1.6) chemisch/mineralogische Zusammensetzung des Stoßes
- (a.1.1.1.1.7) chemische Zusammensetzung der Flüssigphase
- (a.1.1.1.1.8) chemische Zusammensetzung der Gasphase
- (a.1.1.3.1.2) chemische Materialkenngrößen der Festphasen (SB und am Stoß)

Die Festphasen weisen jeweils die folgenden chemischen Materialkennwerte auf:

- (a.1.1.3.1.2.1) Löslichkeitsprodukte,
- (a.1.1.3.1.2.2) Reaktionsraten

Die chemischen Materialkenngrößen sind abhängig von den Zustandsgrößen

- spezifische Festphasenoberflächen,
- chemisches Milieu in der Flüssigphase,
- chemisches Milieu in der Gasphase (Partialdrücke)
(wird vernachlässigt, s. u. Annahme (A3)),
- Temperatur

(a.1.1.3.2) thermische Charakterisierung der KF

(a.1.1.3.2.1) Zustandsgrößen

(a.1.1.3.2.1.1) Temperatur

Wir gehen davon aus, dass der thermische Zustand in der offenen KF nur dann durch die Angabe einer (innerhalb der KF ortsunabhängigen) Temperatur angegeben werden kann, wenn die KF als „thermischer Kurzschluss“ behandelt werden kann (s. u.).

(a.1.1.3.2.2) thermische Materialkenngrößen

Bei geschlossener KF sind zur thermische Charakterisierung der KF keine Kenngrößen erforderlich, da der Wärmetransport (als Gitterschwingung) ausschließlich über die Stoffe des SB und der AZ erfolgt.

Bei offener KF erfolgt der Wärmeübertrag zwischen SB und KF mittels Wärmestrahlung, Verdunstung/Kondensation von Porenwasser und kinetischer Energie von Flüssigkeits- und Gasmolekülen, die sich in der KF befinden. Die kinetische Energie der Flüssigkeits- und Gasmoleküle kann durch Diffusion und Konvektion der Moleküle übertragen werden. Die Konvektion hängt von den lokalen – stark ortsabhängigen – Größen Spaltbreite, Oberflächenrauigkeit und (temperaturabhängiger) Dichte der Fluide ab. Der Wärmeübertrag ist für eine Beschreibung, die sich an diesen mikroskopischen Prozessen orientiert, zu komplex. Eine makroskopische thermische Charakterisierung kann u. E. nur mittels empirischer Größen erfolgen, die wir als „Wärmeübergangskoeffizienten“ bezeichnen. Diese müssten messtechnisch ermittelt werden.

In welchem Umfang sie von den mikroskopischen Verhältnissen abhängen und ob sie mit makroskopischen Zustandsgrößen (wie z. B. dem offenen Volumen der KF) korrelierbar sind, können wir gegenwärtig nicht einschätzen.

Die Unkenntnis schließt nicht zwangsläufig eine (thermo)mechanische Modellierung der abbindenden Abdichtung aus. Eine solche Modellierung setzt jedoch voraus,

- dass gezeigt wird, dass der Wärmeübertrag über die offene KF im Vergleich zu den Temperaturänderungen im SB so schnell erfolgt, dass er als „thermischer Kurzschluss“ behandelt werden kann, oder
- dass der Wärmeübertrag an repräsentativen Vergleichsobjekten messtechnisch als effektive Größe bestimmt wird.

(a.1.1.3.3) mechanische Charakterisierung der KF

(a.1.1.3.3.1) mechanische Zustandsgrößen

(a.1.1.3.3.1.1) Spannungstensor (im Bereichen mit kraftschlüssigem Verbund)

(a.1.1.3.3.1.2) Druck (bzw. Saugspannung) in der Flüssigphase

(a.1.1.3.3.1.3) Druck in der Gasphase

(a.1.1.1.3.2) mechanische Materialkenngrößen

(a.1.1.1.3.2.1) in Bereichen mit kraftschlüssigem Verbund:

Kontaktparameter zur Beschreibung der Rissbildung an den Grenzflächen zwischen SB, Einbauten und dem Salzgestein am Stoß (Haftfestigkeiten)

(a.1.1.1.3.2.2) in Bereichen ohne kraftschlüssigen Verbund:

Kontaktparameter zur Beschreibung des Gleitwiderstands an den Grenzflächen zwischen SB, Einbauten und dem Salzgestein am Stoß

(a.1.1.3.4) stofftransportbezogene Charakterisierung der KF

Wir gehen davon aus, dass es für die offene KF keinen vollständigen Satz an (makroskopischen) stofftransportbezogenen Materialkenngrößen gibt.

In der Abbindephase sind die stofftransportbezogenen Materialkenngrößen für die Flüssigphase lediglich für die Ausbreitung von Überschuss- und Kondenswässern von Relevanz. Die stofftransportbezogenen Materialkenngrößen für die Gasphase sind für den Wärme- und Feuchtigkeitstransport innerhalb der KF von Relevanz; s. (a.1.1.3.2).

Da die Flüssigphase in Unebenheiten am Top des SB (unter der Firste) und unterhalb des SB (auf der Sohle) gespeichert werden kann, gehören zu einer vollständigen stofftransportbezogenen Charakterisierung der KF auch Materialkennwerte für das Speichervermögen von Flüssigkeiten.

Wie bei der thermischen Charakterisierung der KF gehen wir auch hier davon aus, dass der Stofftransport in der Abbindephase für eine Beschreibung, die sich an den mikroskopischen Prozessen orientiert, zu komplex ist. Eine makroskopische stofftransportbezogene Charakterisierung kann u. E. nur mittels empirischer Größen erfolgen, die messtechnisch ermittelt werden müssten.

In wie weit diese Eigenschaften von Relevanz für die in Kap. 3 besprochene Nachweisführung sind, ist im Rahmen der Nachweisführung anzugeben.

(a.1.1.4) Charakterisierung der abdichtungsnahen Zone (AZ)

(a.1.1.4.1) stofflich/chemische Charakterisierung der AZ

(a.1.1.4.1.1) Zustandsgrößen

(a.1.1.4.1.1.1) Ausdehnung und räumliche Anordnung der verschiedenen Gesteine

(a.1.1.4.1.1.2) Mengenverhältnisse der einzelnen Festphasen in den Gesteinen

(a.1.1.4.1.1.3) Porosität /(Riss-)Hohlraumverteilung

(a.1.1.4.1.1.4) spezifische Oberflächen der Festphasen

(a.1.1.4.1.1.5) Porensättigung

(a.1.1.4.1.1.6) chemisch/ mineralogische Zusammensetzung der Festphasen

(a.1.1.4.1.1.7) chemische Zusammensetzung der Flüssigphase („chemisches Milieu“)

(a.1.1.4.1.1.8) chemische Zusammensetzung der Gasphase („chemisches Milieu“)

(wird in der Abbindephase vernachlässigt, s. u. Annahme (A3))

(a.1.1.1.1.2) chemische Materialkenngrößen

Die Festphasen weisen jeweils die folgenden chemischen Materialkennwerte auf:

(a.1.1.1.1.2.1) Löslichkeitsprodukte,

(a.1.1.1.1.2.2) Reaktionsraten

Die chemischen Materialkenngrößen sind abhängig von den Zustandsgrößen

– spezifische Festphasenoberflächen,

– chemisches Milieu in der Flüssigphase¹²,

– chemisches Milieu in der Gasphase (Partialdrücke)

(wird vernachlässigt, s. u. Annahme (A3)),

– Temperatur

¹² Die Abhängigkeiten bestehen eigentlich vom lokalen, mikroskopischen chemischen Milieu. Hier wird eine (ggf. empirisch ermittelte) Abhängigkeit vom makroskopischen chemischen Milieu

(a.1.1.4.2) thermische Charakterisierung der AZ

(a.1.1.4.2.1) Zustandsgrößen

(a.1.1.4.2.1.1) Temperatur

(a.1.1.4.2.2) thermische Materialkenngrößen

Thermische Materialkenngrößen des Verfüllstoffs sind

(a.1.1.4.2.2.1) Wärmekapazität der AZ

(a.1.1.4.2.2.2) Wärmeleitfähigkeit der AZ

(a.1.1.4.2.2.3) thermischer Ausdehnungskoeffizient der AZ

(a.1.1.4.3) mechanische Charakterisierung der AZ

(a.1.1.4.3.1) mechanische Zustandsgrößen

(a.1.1.4.3.1.1) Spannungstensor in der Festphase

(a.1.1.4.3.1.2) Druck (bzw. Saugspannung) in der Flüssigphase

(a.1.1.4.3.1.3) Druck in der Gasphase

(a.1.1.4.3.2) mechanische Materialkenngrößen

(a.1.1.4.3.2.1) Parameter zur Beschreibung der elastischen und plastischen Verformungen („Verformungsparameter“)¹³:

Druck-/Zug-E-Modul, Schubmodul, Kriechparameter, Parameter zur Beschreibung der Dilatanz und der Kontraktion, ...

(a.1.1.4.3.2.2) Parameter zur Beschreibung der Rissbildung in der AZ („Rissbildungsparameter“): Zug-/Druck-Festigkeit, ...

Die mechanischen Materialkenngrößen sind (z. T.) abhängig von den Zustandsgrößen

– Porosität/Mikrorissverteilung

– Porensättigung

– Temperatur

Wir gehen davon aus, dass sich in der Abbindephase der chemisch/ mineralogische Zustand der AZ nicht so stark ändert, dass sich hierdurch die mechanischen Eigenschaften der AZ verändern.

(a.1.1.4.4) stofftransportbezogene Charakterisierung der AZ

(a.1.1.4.4.1) stofftransportbezogene Zustandsgrößen

(a.1.1.4.4.1.1) hydraulisches Potential

(a.1.1.4.4.1.2) hydrostatisches Potential der Gasphase

(a.1.1.4.4.1.3) Stoffkonzentrationen in der Flüssigphase

¹³ Zur Erläuterung der verschiedenen Verformungsprozesse s. u. (Abschnitt „Prozesse“).

(a.1.1.4.4.1.4) Stoffkonzentrationen in der Gasphase / Gaspartialdrücke

(a.1.1.4.4.2) stofftransportbezogene Materialkenngrößen

(a.1.1.4.4.2.1) Diffusionskonstanten,

(a.1.1.4.4.2.2) Permeabilitäten,

(a.1.1.4.4.2.3) Sorptionskoeffizienten.

Die stofftransportbezogenen Materialkenngrößen sind abhängig von den Zustandsgrößen

- spezifische (innere) Oberflächen der Festphasen,
- Porosität,
- Porensättigung,
- chemische Zusammensetzung der Flüssigphase („chemisches Milieu“),
- Temperatur.

Wir gehen davon aus, dass sich in der Abbindephase der chemisch/ mineralogische Zustand der AZ nicht so stark ändert, dass sich aus diesem Grund die stofftransportbezogenen Eigenschaften der AZ verändern.

(a.1.2) Interne Prozesse (in den Abdichtungen ablaufend)

Die stofftransportbezogenen Eigenschaften der Abdichtungen werden primär durch die räumliche Anordnung des Hohlraumsystems bestimmt. Darüber hinaus werden die Permeabilitäten und Diffusionskonstanten auch durch den chemisch/mineralogischen Zustand der Hohlraumwandungen, die Porensättigung und die chemischen (und damit auch die stofftransportbezogenen) Eigenschaften des Fluids bestimmt¹⁴.

Die chemischen, thermischen und mechanischen Einwirkungen auf die Abdichtungen und die chemischen, thermischen und mechanischen Prozesse in den Abdichtungen sind für die LSA nur insofern von Bedeutung, als sie zu Veränderungen im Hohlraumsystem der Abdichtung, in der chemisch/mineralogischen Beschaffenheit der Hohlraumwandungen, in der Porensättigung oder/und der chemischen Fluideigenschaften führen können.

Änderungen im Hohlraumsystem können durch chemische Prozesse (Lösen, Ausfällen/Auskristallisieren, Stoffumwandlung) oder durch mechanische Bewegungen erfolgen. Die möglichen Bewegungen sind Verformungen und (makroskopisches) Reißen. Verformungen können elastisch (d. h. reversibel) oder plastisch (d. h. irreversibel) sein. Beide Arten haben einen sofort auftretenden

¹⁴ Häufig wird die Permeabilität als eine von den Fluideigenschaften unabhängige Materialeigenschaft dargestellt. Dies gilt jedoch nur für idealisierte, nicht mit den Festphasen wechselwirkende Fluide. Die chemischen Reaktionen mit den Festphasen der Abdichtung können die chemische Zusammensetzung und Viskosität der sie durchströmenden Lösungen und Gase verändern. Weiterhin können Sorptions- und Oberflächenspannungseffekte die Durchströmung beeinflussen. Daher ist eine entkoppelte Darstellung von Material- und Fluideigenschaften hier nicht geeignet.

Anteil („Anfangsverformung“) und einen erst zeitlich verzögert auftretenden Anteil („Kriechen“), so dass grundsätzlich zwischen

- der elastischen Anfangsverformung,
- der plastischen Anfangsverformung,
- dem elastischen Kriechen und
- dem plastischen Kriechen („Fließen“)

zu unterscheiden ist. Alle Verformungsarten können zur Veränderung der makroskopischen Hohlräume führen. Die plastischen Verformungen sind mit Änderungen der inneren Verbindungen in den Festphasen verbunden, so dass sie auch mit einer Änderung des mikroskopischen Hohlraumsystems einhergehen können. Es kann unterschieden werden zwischen dilatanten (d. h. mit einer Volumenzunahme verbundenen), volumenneutralen und kontraktanten (d. h. mit einer Volumenabnahme verbundenen) plastischen Verformungen.

Es ist zweckmäßig, beim Hohlraumsystem nach Poren, (offenen) Rissen und Fugen zu unterscheiden. Bei den (offenen) Rissen differenzieren wir zwischen Mikrorissen und Makrorissen. Als Fugen bezeichnen wir makroskopische Hohlräume zwischen zwei aneinander angrenzenden Materialien.

Mögliche chemische und mechanische Beeinflussungen des Hohlraumsystems können somit sein

- die Ausbildung neuer Makrorisse und Fugen
 - mechanisch durch spannungsbedingtes Reißen und
 - chemisch durch Zerstören von Bindungen, das eine mechanische Reaktion nach sich zieht,
- das Aufweiten vorhandener Makrorisse und Fugen
 - mechanisch durch spannungsbedingte (volumenneutrale oder dilatante) Verformung und
 - chemisch durch Auflösung oder durch Zerstören von Bindungen, das eine solche mechanische Reaktion nach sich zieht,
- das Verengen (und Schließen¹⁵) vorhandener Makrorisse und Fugen
 - mechanisch durch spannungsbedingte (volumenneutrale oder kontraktante) Verformung und
 - chemisch durch Ausfällung/Auskristallisation oder volumenvergrößernde Stoffumwandlung,
- die Ausbildung neuer (geöffneter) Mikrorisse¹⁶
 - mechanisch durch spannungsbedingte (dilatante) Verformung und
 - chemisch durch Zerstören von Bindungen, das eine solche Reaktion nach sich zieht,

¹⁵ Unter Schließen verstehen wir lediglich das Beseitigen des Rissvolumens. Ein Verheilen der Risse durch den Aufbau von Verbindungen zwischen den Festphasen an den Rissoberflächen berücksichtigen wir hier nicht.

¹⁶ Die Ausbildung neuer geschlossener Mikrorisse stellt keine Veränderung des Hohlraumsystems dar und wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Wenn sich (zunächst) geschlossene Mikrorisse bilden, erfolgt dies durch volumenneutrales Kriechen. Da hierbei Festkörperbindungen zerstört werden, können sich die mechanischen Materialkennwerte ändern.

- das Aufweiten vorhandener Mikrorisse
 - mechanisch durch spannungsbedingte (dilatante) Verformung und
 - chemisch durch Auflösung, volumenverkleinernde Stoffumwandlung oder durch Zerstören von Bindungen, das eine dilatante Verformung nach sich zieht,
- das Verengen (und Schließen¹⁵) vorhandener Mikrorisse
 - mechanisch durch spannungsbedingte (kontraktante) Verformung und
 - chemisch durch Ausfällung/Auskristallisation oder volumenvergrößernde Stoffumwandlung,
- das Aufweiten vorhandener Poren
 - chemisch durch Auflösung oder volumenverkleinernde Stoffumwandlung,
- das Verengen (und Schließen) vorhandener Poren
 - chemisch durch Ausfällung/Auskristallisation oder volumenvergrößernde Stoffumwandlung,
- das volumenbeständige Umstrukturieren vorhandener Poren
 - chemisch durch Auflösung, Ausfällung/Auskristallisation und Stoffumwandlung,
- das räumliche und chemische Verändern der Poren-, Riss- und Fugenoberflächen
 - chemisch durch Auflösung, Ausfällung/Auskristallisation und Stoffumwandlung,
- das Verändern der transportbezogenen Fluideigenschaften
 - chemisch durch Reaktion mit den Festphasen.

Hierbei gehen wir von folgenden Annahmen bzw. Vereinfachungen aus:

(A1) Unter den hier möglichen mechanischen Verhältnissen können mechanische Verformungen nicht zu einer signifikanten Zu- oder Abnahme des Porenvolumens führen.

(A2) Volumenbeständiges Kriechen des Salzbetons führt nicht zu einer für den Stofftransport relevanten Umstrukturierung von Poren im Bindemittel.

Diese Annahmen sollten von der TUC überprüft und – sofern zutreffend – begründet werden.

Wir kommen mit diesen Annahmen zu folgenden Ergebnissen:

- Das Hohlräumssystem (sowohl Poren- als auch Riss- und Fugenhohlraum) und damit die stofftransportbezogenen Eigenschaften können sich durch **chemische Prozesse** verändern.
- Der Riss- und Fugenhohlraum und damit die stofftransportbezogenen Eigenschaften können sich durch die **mechanischen Prozesse** „Reißen“ und dilatante, volumenbeständige oder kontraktante „Verformung“ verändern.

Neben der direkten Beeinflussung des Hohlraumzustands und damit der stofftransportbezogenen Eigenschaften können die chemischen und mechanischen Einwirkungen und Abläufe auch indirekt wirken. Indem sie die Festkörperstruktur in der Abdichtung verändern, verändern sie auch deren chemische und mechanische Materialkenngrößen. Hierdurch ändert sich der Umfang, mit dem die stofftransportbezogenen Eigenschaften der Abdichtung auf die chemischen und mechanischen Einwirkungen reagieren.

Die chemischen Prozesse sind von der Temperatur und dem chemischen Milieu in der Flüssig- und Gasphase abhängig. Dadurch sind sie abhängig von **thermischen Prozessen** und den **stofftransportbezogenen Prozessen** (Diffusion, Konvektion, Sorption/Fällung/Bindung während des Transports) in der Flüssigkeits- und der Gasphase.

Die mechanischen Prozesse sind über die chemische Beeinflussung der mechanischen Materialeigenschaften von den chemischen Prozessen abhängig. Sie sind auch (explizit) von der Temperatur und der Porensättigung abhängig. Dadurch sind sie sowohl explizit als auch (über die chemischen Prozesse) implizit von thermischen und feuchtigkeitsbezogenen Prozessen (den chemischen Prozessen mit Einfluss auf die Porensättigung und dem Flüssigkeitstransport) abhängig. Letzterer ist Teil der stofftransportbezogenen Prozesse.

Zu den stofftransportbezogenen Prozessen rechnen wir auch die Erosion und die Ablagerung von Schwebstoffen. Diese können die stofftransportbezogenen Materialkenngrößen verändern.

Im Detail läuft innerhalb der Abdichtungen während der Abbindephase eine Vielzahl von Prozesse ab, die wir im folgenden - entsprechend der geschilderten Gliederung - zu Gruppen zusammengefasst haben. Wir gehen davon aus, dass einige dieser Reaktionen bzw. Gruppen vernachlässigt werden können. Dies ist jedoch bei der Nachweisführung explizit anzugeben bzw. zu zeigen (z. B. mittels einer rechnerischen Abschätzung der jeweiligen Größenordnung der Prozesse).

Die anfängliche Überschusswasserfreisetzung aus dem Salzbeton hatten wir schon der Phase des Materialeintrags zugeordnet. Der Vollständigkeit halber haben wir sie unter (a.1.2.0.1) noch einmal aufgeführt.

(a.1.2.0) *stoffliche Prozesse*

(a.1.2.0.1) *anfängliche Überschusswasserfreisetzung des Salzbetons*

(a.1.2.1) chemische Prozesse

(A3) *Der Einfluss der Gasphase auf die chemischen Reaktionen in der Abdichtung wird in der Phase des Abbindens aufgrund des vergleichsweise geringen Zeitraums und der vergleichsweise geringen Gasdruckdifferenzen vernachlässigt.*

chemische Prozesse im Salzbeton

(a.1.2.1.1) chemische Reaktionen des Bindemittels des Salzbetons

Die chemischen Reaktionen des Bindemittels sind eine Überlagerung von

- (autogenen, d. h. unabhängig von äußeren Einwirkungen ablaufenden) Abbindereaktionen,
- Reaktionen mit den Einbauten,
(werden aufgrund der vergleichsweise kurzen Dauer der Phase des Abbindens vernachlässigt, s. u. (A4))
- Reaktionen mit dem Salzgrus und dem Salzgestein am Stoß und in der AZ (der Stoffaustausch erfolgt über die Porenlösung) und
- Reaktionen aufgrund eingetragener Gase (i. w. CO₂, s. (a.2.1))

(werden aufgrund der vergleichsweise kurzen Dauer der Phase des Abbindens und der geringen Gasdruckdifferenzen in der Phase des Abbindens vernachlässigt, s. (A3))

Die chemischen Reaktionen sind mit Stoffumwandlung und Energieumsatz verbunden. Hierdurch ändert sich der stofflich/chemische Zustand und u. U. auch der thermische Zustand und der Spannungszustand. Weiterhin können sich die stofflich/chemischen, thermischen, mechanischen und stofftransportbezogenen Materialkenngrößen verändern.

Die chemischen Reaktionen des Bindemittels sind verbunden mit:

(a.1.2.1.1.1) Änderung der Mengenverhältnisse und der räumlichen Anordnung der Festphasen

Die chemischen Reaktionen führen nicht nur zu einer Änderung der Mengenverhältnisse der verschiedenen Festphasen, sondern auch zu Änderungen bei den inneren Bindungen (und damit bei den mikroskopischen Hohlräumen) innerhalb einer Festphase oder zwischen verschiedenen Festphasen. Diese Änderungen können Auswirkungen auf die makroskopischen Materialeigenschaften haben:

(a.1.2.1.1.1.1) Änderung der chemischen Eigenschaften des SB
(Reaktionsraten sind von der Größe der Oberfläche einer Festphase abhängig.)

(a.1.2.1.1.1.2) Änderung der thermischen Eigenschaften des SB
(vernachlässigbar)

(a.1.2.1.1.1.3) Änderung der mechanischen Eigenschaften des SB

(a.1.2.1.1.1.4) Änderung der stofftransportbez. Eigenschaften des SB

(a.1.2.1.1.2) Änderung der Porensättigung des SB, verbunden mit

(a.1.2.1.1.2.1) Änderung der thermischen Eigenschaften des SB
(vernachlässigbar)

(a.1.2.1.1.2.2) Änderung der mechanischen Eigenschaften des SB;
s. (a.1.1.1.3)

(a.1.2.1.1.2.3) Änderung der stofftransportbez. Eigenschaften des SB;
s. (a.1.1.1.4)

(a.1.2.1.1.3) Änderung der Stoffmenge in der Gasphase des SB
(bzgl. der Eigenschaften des SB vernachlässigbar)

(a.1.2.1.1.4) Änderung der chemisch/mineralogischen Zusammensetzung der Festphasen, verbunden mit

(a.1.2.1.1.4.1) Änderung der chemischen Eigenschaften des SB

(a.1.2.1.1.4.2) Änderung der thermischen Eigenschaften des SB
(vernachlässigbar)

(a.1.2.1.1.4.3) Änderung der mechanischen Eigenschaften des SB

- (a.1.2.1.1.4.4) Änderung der stofftransportbez. Eigenschaften des SB (durch die geänderte chemische Zusammensetzung ändern sich die Reaktionen mit den Gasen und Fluiden und damit deren Diffusionskonstanten, Permeabilitäten und Sorptionskoeffizienten)
- (a.1.2.1.1.5) Änderung der chemischen Zusammensetzung der Flüssigphase in den Poren des SB, verbunden mit
 - (a.1.2.1.1.5.1) Änderung der chemischen Eigenschaften des SB (wg. (a.1.1.1.1))
 - (a.1.2.1.1.5.2) Änderung der stofftransportbez. Eigenschaften des SB
- (a.1.2.1.1.6) Änderung der chemischen Zusammensetzung der Gasphase in den Poren des SB (bzgl. der Eigenschaften des SB vernachlässigbar)
- (a.1.2.1.1.7) Wärmefreisetzung
- (a.1.2.1.2) chemische Reaktionen des Salzzuschlags

Die Reaktionen bestehen in Auf- und Umlöseprozessen. Diese sind grundsätzlich möglich, sofern die flüssige Phase im Frischbeton nicht salzgesättigt ist, weil zwischen Salzzuschlag und Bindemittel kein thermodynamischer Gleichgewichtszustand besteht, oder sofern der Salzzuschlag aus unterschiedlichen Salzmineralen besteht. Der Stoffaustausch kann mittels Diffusion (a.1.2.4.6) in der Flüssigphase erfolgen. Die Gasphase ist an diesen Reaktionen nicht beteiligt. Die Wärmefreisetzung ist vernachlässigbar.

Sofern es zu chemischen Reaktionen des Salzzuschlags kommt, sind diese verbunden mit:

- (a.1.2.1.2.1) Änderung des Volumens und der räumlichen Anordnung der Festphasen
 - (a.1.2.1.2.2) Änderung des Volumens der Flüssigphase
 - (a.1.2.1.2.3) Änderung der chemischen Zusammensetzung der Festphase
 - (a.1.2.1.2.4) Änderung der chemischen Zusammensetzung der Flüssigphase
- Inwieweit sich hierdurch Änderung der chemischen, thermischen, mechanischen und stofftransportbezogenen Eigenschaften des Salzbetonkörpers (SB) ergeben, ist dann zu prüfen.
- (a.1.2.1.3) chemische Reaktionen der Einbauten

(A4) Wir gehen davon aus, dass chemische Reaktionen der Einbauten in der Abbindephase vernachlässigt werden können.

Diese Annahme ist zu prüfen, wenn die Art der vorgesehenen Einbauten und ihre Materialien vom BfS spezifiziert sind.

chemische Prozesse in der KF

(a.1.2.1.4) chemische Reaktionen des Salzes am Streckenstoß

Die Reaktionen bestehen in Auf-, Umlöse- und Ausfällungsprozessen. Erstere sind grundsätzlich möglich, sofern zwischen dem Salz am Stoß und dem Bindemittel kein thermodynamischer Gleichgewichtszustand besteht oder der Stoß aus unterschiedlichen Salzmineralen besteht. Der Stoffaustausch kann mittels Diffusion (a.1.2.4.6) in der Flüssigphase erfolgen.

Die Gasphase ist an den Auf- und Umlöseprozessen nicht beteiligt. Sie kann – bei einem konvektiven Gasfluss durch die KF – ggf. einen Einfluss auf Ausfällungsprozesse haben. In der Abbindephase vernachlässigen wir dies (s. (A3)). Die Wärmefreisetzung ist vernachlässigbar.

Die chemischen Reaktionen des Salzes am Streckenstoß sind verbunden mit:

(a.1.2.1.4.1) Änderung des Volumens und der räumlichen Anordnung der Festphase

(a.1.2.1.4.1.1) Änderung der chemischen Eigenschaften der KF
(vernachlässigbar)

(a.1.2.1.4.1.2) Änderung der thermischen Eigenschaften der KF
(vernachlässigbar)

(a.1.2.1.4.1.3) Änderung der mechanischen Eigenschaften der KF

(a.1.2.1.4.1.4) Änderung der stofftransportbez. Eigenschaften der KF

(a.1.2.1.4.2) Änderung des Volumens der Flüssigphase (vernachlässigbar)

(a.1.2.1.4.3) Änderung der chemischen Zusammensetzung der Festphase

(a.1.2.1.4.3.1) Änderung der chemischen Eigenschaften der KF

(a.1.2.1.4.3.2) Änderung der thermischen Eigenschaften der KF
(vernachlässigbar)

(a.1.2.1.4.3.3) Änderung der mechanischen Eigenschaften der KF

(a.1.2.1.4.3.4) Änderung der stofftransportbez. Eigenschaften der KF

(a.1.2.1.4.4) Änderung der chemischen Zusammensetzung der Flüssigphase (bzgl. der Eigenschaften der KF vernachlässigbar)

chemische Prozesse in der AZ

(a.1.2.1.5) chemische Reaktionen des Salzes in der AZ

Die Reaktionen bestehen in Auf-, Umlöse- und Ausfällungsprozessen. Diese sind grundsätzlich möglich, sofern zwischen dem Salz in der AZ und dem Bindemittel kein thermodynamischer Gleichgewichtszustand besteht oder die AZ aus unterschiedlichen Salzmineralen besteht. Der Stoffaustausch kann mittels Diffusion in der Flüssigphase (a.1.2.4.7) erfolgen.

Die Gasphase wird vernachlässigt, s. (A3).

Die Wärmefreisetzung ist vernachlässigbar.

Die möglichen Änderungen aufgrund chemischer Reaktionen des Salzes in der AZ sind analog zu denen am Stoß.

(a.1.2.2) thermische Prozesse

(a.1.2.1.1) Wärmefreisetzung im SB durch Abbindereaktion

(a.1.2.2.1) Temperaturanstieg/-abfall in Verfüllmaterial, Einbauten (Trennbleche, Leitungen, Abspannungen, Stützkonstruktionen) und AZ verbunden mit

(a.1.2.2.1.1) Volumenänderung des Verfüllmaterials, der Einbauten und der AZ bei Temperaturänderung bzw. Spannungsänderung bei Verformungsbehinderung

(a.1.2.2.1.2) Änderung der temperaturabhängigen chemischen Materialeigenschaften (a.1.1.1.1)

(a.1.2.2.1.3) Änderung der temperaturabhängigen mechanischen Materialeigenschaften (a.1.1.1.3), (a.1.1.4.3)

(a.1.2.2.1.4) Änderung der temperaturabhängigen stofftransportbezogenen Materialeigenschaften (a.1.1.1.4), (a.1.1.4.4)

(a.1.2.2.2) Wärmetransport

- innerhalb des SB und der AZ
- zwischen SB und AZ

(a.1.2.3) mechanische Prozesse

Volumenänderung des Verfüllmaterials (Salzbeton) durch C-T-S-Prozesse¹⁷

(a.1.2.3.1) Volumenänderung des Verfüllmaterials sowie am Stoß und in der AZ bei Änderungen der Festphasen aufgrund chemischer Reaktionen (a.1.2.1.1.1), (a.1.2.1.2.1), (a.1.2.1.4.1), (a.1.2.1.5.1) differenziert nach

- (autogenen) Abbindereaktionen und
- Reaktionen zwischen Bindemittel, Salzgruß und dem Salzgestein am Stoß und in der AZ (der Stoffaustausch erfolgt über die Porenlösung)

bzw. Spannungsänderungen bei Verformungsbehinderung

(a.1.2.3.2) Volumenänderung des Verfüllmaterials bei Änderungen der Porensättigung („Trocknungsschwinden“, „Quellen“) bzw. Spannungsänderungen bei Verformungsbehinderung

¹⁷ chemische, thermische und stofftransportbezogene Prozesse

(a.1.2.2.1.1) Volumenänderung des Verfüllmaterials, der Einbauten und der AZ bei Temperaturänderung bzw. Spannungsänderung bei Verformungsbehinderung

Änderung der mechanischen Eigenschaften

(a.1.2.1.x.x) Änderung der mechanischen Eigenschaften infolge stofflich/chemischer Veränderungen der Festphasen in SB, KF und AZ

(a.1.2.3.3) Änderung der mechanischen Eigenschaften (Kriechrate, andere?) in SB, KF und AZ infolge der Veränderung der Porensättigung

(a.1.2.3.4) Änderung der mechanischen Eigenschaften (Kriechrate, andere?) in SB und AZ infolge der Veränderung der Temperatur

spannungsinduzierte Bewegungen und ihre Folgen

(a.1.2.3.5) elastische Verformungen im SB und AZ

Wir gehen davon aus, dass elastische Verformungen in einem rissfreien Festkörper nicht mit einer Änderung der chemischen, thermischen, mechanischen und stofftransportbezogenen Materialparameter verbunden sind. (Die Bildung von Rissen wird (a.1.2.3.9) zugeordnet.)

Bei der Existenz von Makrorissen bzw. Fugen können die elastischen Bewegungen dagegen zu deren Vergrößerung bzw. Verkleinerung führen, verbunden mit

(a.1.2.3.5.1) Änderung des (Makro-)Rissvolumens

(a.1.2.3.5.2) Änderung der stofftransportbezogenen Materialparameter (aufgrund der Volumenänderungen (a.1.2.3.5.1))

(a.1.2.3.6) plastische volumenbeständige Verformungen im SB und AZ

Wir gehen davon aus, dass plastische volumenbeständige Verformungen in einem rissfreien Festkörper nicht mit einer Änderung der chemischen, thermischen und stofftransportbezogenen Materialparameter verbunden sind. (Die Bildung von Rissen wird (a.1.2.3.9) zugeordnet.) Durch die Bewegung können sich aber geschlossene Mikrorisse bilden, die die mechanischen Materialparameter beeinflussen können.

Die elastischen volumenbeständige Kriechbewegungen können zur Vergrößerung bzw. Verkleinerung vorhandener Makrorissen bzw. Fugen führen.

Die plastischen volumenbeständigen Bewegungen sind deshalb potentiell verbunden mit

(a.1.2.3.6.1) Änderung des (Makro-)Rissvolumens

(a.1.2.3.6.2) Änderung der mechanischen Materialparameter

(a.1.2.3.6.3) Änderung der stofftransportbezogenen Materialparameter (aufgrund der Volumenänderungen (a.1.2.3.6.1))

- (a.1.2.3.7) plastische dilatante Verformungen im SB und AZ, verbunden mit
 - (a.1.2.3.7.1) Zunahme des Hohlraumvolumens (von Makro- und Mikrorissen)
 - (a.1.2.3.7.2) Änderung der chemischen Materialparameter (neue Oberflächen => Änderung der Reaktionsraten)
 - (a.1.2.3.7.3) Änderung der mechanischen Materialparameter
 - (a.1.2.3.7.4) Änderung der stofftransportbezogenen Materialparameter (aufgrund der Volumenänderungen (a.1.2.3.7.1))

Die Einflüsse auf die thermischen Eigenschaften sind vernachlässigbar.

- (a.1.2.3.8) plastische kontraktante Verformungen im SB und AZ, verbunden mit
 - (a.1.2.3.8.1) Abnahme des (Riss-)Porenvolumens (von Makro- und Mikrorissen)
 - (a.1.2.3.8.2) Änderung der chemischen Materialparameter (weniger Oberflächen)
 - (a.1.2.3.8.3) Änderung der mechanischen Materialparameter
 - (a.1.2.3.8.4) Änderung der stofftransportbezogenen Materialparameter

- (a.1.2.3.9) (Makro-)Rissbildung

- im Inneren des Salzbetons
- im Salzbetonkörper an Einbauten (Trennbleche, Leitungen, Abspannungen, Stützkonstruktionen)
- in der KF (bei Ablösen des SB vom Streckenstoß)
- in der AZ (falls kein Ablösen des SB vom Streckenstoß erfolgt)

verbunden mit

- (a.1.2.3.9.1) Zunahme des Hohlraumvolumens (von Makro- und Mikrorissen)
- (a.1.2.3.9.2) Änderung der chemischen Materialparameter (neue Oberflächen)
- (a.1.2.3.9.3) Änderung der mechanischen Materialparameter
- (a.1.2.3.9.4) Änderung der stofftransportbezogenen Materialparameter (aufgrund von (a.1.2.3.9.1) und (a.1.2.3.9.2))

Die Einflüsse auf die thermischen Eigenschaften sind vernachlässigbar.

- (a.1.2.3.10) Spannungsänderungen aufgrund von Verformungen und Rissbildung im SB und AL

Wir gehen davon aus, dass Spannungsänderungen zu keiner Änderung der chemischen, thermischen, mechanischen und stofftransportbezogenen Materialparameter führen.

- (a.1.2.3.11) Veränderungen bei den Einbauten

Bei fehlerfreiem Einbau erwarten wir keine signifikante Veränderung der Einbauten (z. B. mech. Beschädigung) in Folge der Prozesse (a.1.2.3.1) bis (a.1.2.3.9).

- (a.1.2.4) stofftransportbezogene Prozesse
 - (a.1.2.4.1) Änderung der Porosität, der Permeabilitäten und der Diffusionskonstanten aufgrund von Hohlraumveränderungen
 - (a.1.2.4.2) Diffusion von Gas in SB und AZ
Der Einfluss der Gasphase auf die chemischen Reaktionen wird entsprechend (A3) vernachlässigt. (Feuchtigkeitstransport wird in (a.1.2.4.5) berücksichtigt.)
 - (a.1.2.4.3) Konvektion von Gas in SB und AZ
Der Einfluss der Gasphase auf die chemischen Reaktionen wird entsprechend (A3) vernachlässigt. (Feuchtigkeitstransport wird in (a.1.2.4.5) berücksichtigt.)
 - (a.1.2.4.4) Sorption/Lösung/Bindung von Gasen während des Transports
Der Einfluss der Gasphase auf die chemischen Reaktionen wird entsprechend (A3) vernachlässigt. (Feuchtigkeitstransport wird in (a.1.2.4.5) berücksichtigt.)
 - (a.1.2.4.5) Feuchtigkeitstransport innerhalb des SB und Feuchtigkeitsaustausch zwischen SB und AZ, verbunden mit
 - (a.1.2.4.5.1) Änderung der von der Porensättigung abhängigen mechanischen Materialeigenschaften (Verformungsparameter) in der SB und AZ
 - (a.1.2.4.6) Diffusion von Porenwasserinhaltsstoffen innerhalb des SB und zwischen SB und AZ, verbunden mit einer Beeinflussung der
 - (a.1.2.1) *chemischen Prozesse*
 - (a.1.2.4.7) Konvektion von Porenwasserinhaltsstoffen innerhalb des SB und zwischen SB und AZ
(A5) Die Konvektion von Porenwasserinhaltsstoffen wird in der Phase des Abbindens vernachlässigt.
 - (a.1.2.4.8) Sorption/Fällung/Bindung von Porenwasserinhaltsstoffen während des Transports

(A.2) KOPPELNDE PROZESSE

Die Umgebung der Abdichtungen besteht aus dem umgebenden Salzgestein außerhalb der abdichtungsnahen Zone und den (stirnseitig) angrenzenden Grubenbauen¹⁸. Diese können entweder offen sein oder sie können Abschalungen oder Verfüllmaterial (aus vorherigen Verfüllmaßnahmen) enthalten.

Die Einwirkungen der Umgebung auf die Abdichtungen können als

- Stoffeintrag (Wasser, Wasserinhaltsstoffe, Gase),
- Energieeintrag (Wärmeenergie oder Energie durch radioaktive Strahlung) und
- (mechanischer) Krafteintrag

erfolgen.

Der mechanische Krafteintrag kann in einen „reaktiven“ und einen „aktiven“ Teil aufgespalten werden. Die reaktiven Kräfte umfassen die Gegenkräfte der Umgebung. Sie treten an den Grenzen der Abdichtungen auf und sind eine Reaktion auf Kräfte, die ihren Ursprung in den Abdichtungen haben. Diese Gegenkräfte bewirken eine Verformungsbehinderung. Die aktiven Kräfte haben ihren Ursprung außerhalb der Abdichtungen (z. B. Gravitation und Konvergenz).

Da neben den Einträgen in gleicher Weise auch Austräge zu erfassen sind, sollte bzgl. der Einwirkungen besser von Stoff- und Energieaustausch sowie Kraftkopplung gesprochen werden. Die Austausche bzw. Kopplungen von Umgebung und Abdichtung in der Phase des Abbindens können weiter differenziert werden:

(a.2.1) Stoffaustausch

(a.2.1.1) über die Gasphase:

Der Stoffaustausch zwischen Abdichtung und angrenzenden offenen Grubenbauen betrifft i. W. Wasserdampf (aus der Abdichtung in die Grubenluft; „Austrocknung“) und CO₂ (aus der Grubenluft in die Abdichtung)

Der Stoffaustausch zwischen Abdichtung und angrenzender Verfüllung über die Gasphase wird von uns in der Abbindephase vernachlässigt.

(a.2.1.2) über die Flüssigphase:

ggf. diffusiver Austausch mit angrenzender Verfüllung

Aufgrund der vergleichsweise kurzen Dauer der Abbindephase und der Länge der Abdichtungen vernachlässigen wir hier die Wirkungen eines Stoffaustauschs über die Flüssigphase.

¹⁸ Formal gehört die gesamte Erde zu der zu berücksichtigenden Umgebung, da sie über die Gravitationskraft auf die Abdichtung einwirkt. Es reicht hier jedoch aus, die auf die Abdichtung und die Umgebung wirkende Schwerkraft zu berücksichtigen. Die übrigen FEP der Erde können dann vernachlässigt werden.

Aus dem Salzbeton kann kein Feuchteintrag in das Gebirge erfolgen. Der Eintrag kann nur in die AZ erfolgen und diese wird definitionsgemäß der Abdichtung zugerechnet.

(a.2.2) Energieaustausch

(a.2.2.1) in Form von thermischer Bewegung:

- (mantelseitiger) Wärmeaustausch mit dem Gebirge
- (stirnseitiger) Wärmeaustausch mit der Grubenluft bzw. der Verschalung oder der angrenzenden Verfüllung

Grundsätzlich kann es auch zu einem Wärmeeintrag in die Abdichtung (AZ, KF, SB) kommen. Dies kann dann relevant werden, wenn eine Strecke oder ein Abbau in unmittelbarer Nähe zur Abdichtung verfüllt wird.

(a.2.2.2) in Form von kinetischer Energie freier Teilchen:

Wasserdampf, der die Abdichtung verlässt

(a.2.2.3) in Form von elektromagnetischer Strahlung:

Wärmestrahlung

(die radioaktivitätsbedingte Strahlung kann vernachlässigt werden)

(a.2.3) Kraftkopplung

Einträge in die Abdichtung

(a.2.3.1) Gewichtskraft (Gravitation)

(a.2.3.2) verformungsbehindernde Gegenkräfte des (mantelseitigen) Gebirges und der (stirnseitigen) Verschalung bzw. angrenzenden Verfüllung

(a.2.3.3) konvergenzbedingte Kräfte des (mantelseitigen) Gebirges

(a.2.3.4) stoßartige Kräfte aus dem (mantelseitigen) Gebirge, z. B. aufgrund von Erdbeben

(a.2.3.5) stoßartige Kräfte aus der (stirnseitigen) Grube, z. B. aufgrund von untertägigen Explosionen (offene Grubenbaue) oder Erdbeben (verfüllte Grubenbaue)

Krafteinträge aus der angrenzenden Verfüllung infolge von dort stattfindenden Bewegungen werden in der Abbindephase vernachlässigt.

Austräge aus der Abdichtung

(a.2.3.6) konvergenzbehindernde Gegenkräfte der Abdichtung

(a.2.3.7) Krafteinträge in das Gebirge aufgrund von Volumenänderungen in der Abdichtung (bzw. Spannungsaufbau in den Abdichtungen bei Verformungsbehinderung)

Störfallereignisse (und damit die stoßartigen Kräfte) werden im weiteren von der Analyse ausgeschlossen.

(A.3) EXTERNE FEP

(a.3.1) Merkmale (Zustände und Eigenschaften) der Umgebung

Um die Einwirkungen der Umgebung auf die Abdichtungen erfassen zu können, muss die Umgebung durch die folgenden Zustände und Eigenschaften beschrieben werden:

(a.3.1.1) Charakterisierung des umgebenden Gebirges (ohne AZ)

(a.3.1.1.1) stofflich/chemische Charakterisierung des umgebenden Gebirges (ohne AZ)

- Räumliche Ausdehnung der berücksichtigten Umgebung,
- Materialbelegung,
- chemisch/mineralogische Zusammensetzung
(soweit für als Basis für (a.3.1.3) erforderlich)

Eine chemische Charakterisierung des umgebenden Gebirges ist nicht erforderlich, da das Gebirge außerhalb der AZ nicht an chemischen Reaktionen mit den Abdichtungen teilnehmen kann.

(a.3.1.1.2) thermische Charakterisierung des umgebenden Gebirges (ohne AZ)

- thermische Materialkenngrößen
- thermischer Zustand

(a.3.1.1.3) mechanische Charakterisierung des umgebenden Gebirges (ohne AZ)

- mechanische Materialkenngrößen einschließlich deren Abhängigkeiten von anderen Parametern (Temperatur)
- Spannungszustand

(a.3.1.1.4) stofftransportbezogene Charakterisierung des umgebenden Gebirges (ohne AZ)

Wir gehen davon aus, dass das (nicht aufgelockerte) Gebirge im Bereich der Abdichtungen keinen Stofftransport zulässt.

(a.3.1.2) Charakterisierung der angrenzenden verfüllten Grubenbaue

(a.3.1.2.1) stofflich/chemische Charakterisierung der Verfüllung in angrenzenden Grubenbauen

- Materialbelegung,
- Porosität und Porensättigung
- Chemische Zusammensetzung / chemische Materialkenngrößen
(eingeschränkt)

Da wir den Stoffaustausch zwischen Abdichtung und angrenzender Verfüllung in der Phase des Abbindens vernachlässigen, muss die chemische Charakterisierung der angrenzenden Verfüllung (Zusammensetzung, Reaktionen) nur im Hinblick auf ihre Wärmefreisetzung berücksichtigt werden.

- (a.3.1.2.2) thermische Charakterisierung der Verfüllung in den angrenzenden Grubenbauen
- thermische Materialkenngrößen
 - thermischer Zustand

- (a.3.1.2.3) mechanische Charakterisierung der Verfüllung in den angrenzenden Grubenbauen

Eine mechanische Charakterisierung der Verfüllung in den angrenzenden Grubenbauen ist nur eingeschränkt erforderlich, da Kräfteinträge aus der angrenzenden Verfüllung infolge von dort stattfindenden Bewegungen vernachlässigt werden. Es wird nur die Verformungsbehinderung der Abdichtung berücksichtigt.

- (a.3.1.2.4) stofftransportbezogene Charakterisierung der Verfüllung in den angrenzenden Grubenbauen

Da wir den Stoffaustausch zwischen Abdichtung und angrenzender Verfüllung in der Phase des Abbindens vernachlässigen, kann die stofftransportbezogene Charakterisierung der angrenzenden Verfüllung entfallen.

- (a.3.1.3) Charakterisierung der angrenzenden offenen Grubenbaue

- (a.3.1.3.1) stoffliche Charakterisierung der Gasphase in den offenen Grubenbauen (Gaszusammensetzung inkl. Feuchtegehalt)

- (a.3.1.3.2) thermische Charakterisierung der Gasphase in den offenen Grubenbauen

(a.3.2) Ereignisse und Prozesse in der Umgebung

Die in (a.2) aufgeführten Kopplungen bzw. Austausche werden von den folgenden externen Ereignissen und Prozessen beeinflusst, die deshalb in der Phase des Abbindens zu berücksichtigen sind:

- (a.3.2.1) stoffbezogene Ereignisse und Prozesse

- (a.3.2.1.1) Verfüllarbeiten in der Umgebung, verbunden mit

(a.3.2.1.1.1) Feuchteinträgen in die Grubenluft,

(a.3.2.1.1.2) Wärmeeinträgen in das Gebirge,

(a.3.2.1.1.3) Änderung des Spannungszustands im Gebirge (durch den Materialeintrag und durch feuchtigkeits- und temperaturbedingte Änderung der Konvergenzprozesse).

- (a.3.2.2) thermische Prozesse

(a.3.2.1.1.2) *Wärmeeinträge in das Gebirge aufgrund von Abbindeprozessen in der Umgebung*

- (a.3.2.2.1) Temperaturänderung in der Umgebung, verbunden mit

- (a.3.2.2.1.1) Volumenänderung des Verfüllmaterials und des Gebirges in der Umgebung bei Temperaturänderung bzw. Spannungsaufbau bei Verformungsbehinderung
- (a.3.2.2.1.2) Änderung der temperaturabhängigen mechanischen und stofftransportbezogenen Parameter in dem umgebenden Verfüllmaterial und Gebirge
- (a.3.2.2.2) Wärmetransport in der Umgebung
- (a.3.2.3) mechanische Ereignisse und Prozesse
 - (a.3.2.3.1) Erdbeben
 - (a.3.2.3.2) Volumenänderung des (Salz-)Gesteins bei Temperaturänderung bzw. Spannungsaufbau bei Verformungsbehinderung
 - (a.3.2.3.3) Änderung der mechanischen Eigenschaften des Gebirges infolge der Veränderung der Temperatur
 - (a.3.2.3.4) elastische Verformungen im Salzgebirge aufgrund von Spannungen
 - (a.3.2.3.5) plastische volumenbeständige Verformungen im Salzgebirge aufgrund von Spannungen
 - (a.3.2.3.6) Spannungsänderungen aufgrund von Kriechbewegungen im Gebirge
Dilatante und kontraktante Verformungen sowie Rissbildung können definitionsgemäß nicht im Gebirge, sondern nur in der AZ auftreten.
- (a.3.2.4) stofftransportbezogene Ereignisse und Prozesse
 - (a.3.2.1.1.2) *Feuchtigkeitseinträge in die Grubenluft aufgrund von Verfüllarbeiten bzw. aus Verfüllungen in der Umgebung*
 - (a.3.2.4.2) Entzug der Luftfeuchte in der Umgebung durch das Salz
 - (a.3.2.4.3) Austausch der Gasphase vor der Abdichtung aufgrund der Bewitterung